

報告 開口を有する RM 増設耐震壁に関する実験研究

森 浩二*1・山内 正明*2・柏木 隆男*3・中澤 敏樹*1

要旨：既存 RC 造建物のフレーム内に RM 造による増設壁を構築し、増設耐震壁（RM 増設耐震壁）とする耐震補強工法について、壁内に窓用またはドア用の開口を設けた場合の性状を調べるための実験を行った。1/2 モデルの RC 造フレーム内に開口を有する RM 増設壁を構築したものを試験体とし、一定軸力の下での繰り返し水平載荷を行った。実験の結果、開口付き RM 増設壁を含む RC フレームの耐力は、開口の大きさによる低減率を考慮した既存の耐力式によって評価できることを確認した。

キーワード：RM 造, 増設耐震壁, 開口, 耐震補強

1. はじめに

RM 造は型枠状ブロックの一種である RM ユニット、鉄筋およびコンクリートまたはモルタルからなる構造であり、鉄筋コンクリート造としての構造特性と組積造としての施工性を併せ持つことから鉄筋コンクリート組積造とも呼ばれる¹⁾。筆者らは、RM 造による増設壁を既存 RC 建物のフレーム内に構築し、増設耐震壁（RM 増設耐震壁）とする耐震補強工法の開発を行ってきた。この工法は、RC 増設耐震壁による耐震補強工法を置き換えるものであり、型枠工事の削減、資材搬入の容易さなどの耐震補強工事において有利な点を備えている。前報²⁾では、無開口の RM 増設耐震壁に対する載荷実験の結果についての報告を行った。

本報では、RM 増設壁内に窓用またはドア用の開口を有する場合について、フレーム載荷実験の結果および結果の検討についての報告を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧および諸元を表-1に示す。試験体は、図-1(a)に示す RC 既存フレームの内側に RM 増設壁を構築したもので、無開口のもの、窓タイプの開口を持つもの、ドアタイプの開口を持つものの計3体である。各試験体のユニット割付、および配筋を図-2に示す。試験体の実部材に対する縮尺率は約1/2.5である。ただし、RM ユニットは図-1(b)に示すコンクリート製12型 RM ユニットの1/2縮小モデルを使用した。

既存フレーム部の柱はせん断破壊先行型として計画した。また、開口の大きさは等価開口周比が0.4となるようにした。

(1) 壁体部

壁体部はRMユニット、鉄筋、モルタルで構成される。

目地幅は縦横とも3mmとし、壁筋はシングル配筋とした。RM ユニット内部はモルタルを充填し、硬化後、梁下の空隙に無収縮グラウトモルタルを注入した。

(2) 既存フレームと RM 増設壁との接合部

RM 増設壁と既存フレームはあと施工アンカーによって接合される。あと施工アンカーはカプセル型の有機系接着剤を使用したものを用い、アンカー筋径を D10、有効埋め込み長さは7da（da:アンカー筋径）、定着長さを20da（頭ナット付）とした。既存フレーム部の接合面は100mm×50mm 角に1箇所割合で、直径15mm 深さ5mm 程度のチッピングによる目荒しを行った。

表-1 試験体一覧

試験体	形状	開口部			開口補強筋	
		開口に対する低減率			鉛直	水平
		ℓ_o/ℓ	η	r		
RM-F	無開口					
RM-W	窓開口	0.34	0.36	0.64	1-D13	1-D13
RM-D	ドア開口	0.23	0.37	0.63		

注) $r = \min(r_1, r_2)$

$$r_1 = 1 - \ell_o/\ell, \quad r_2 = 1 - \eta$$

$$\eta = \sqrt{(h_o \ell_o / h \ell)}$$

ℓ_o : 開口部の高さ、 ℓ : 柱中心間距離

h_o : 開口部の高さ、 h : 壁脚部と加力梁中心間距離

【共通事項】

1) 既存フレーム

柱断面：幅225mm×高さ225mm

柱主筋：8-D13, 帯筋：D6@150

2) 壁部

RMユニット：幅195mm×高さ100mm×壁厚100mm

壁縦筋：D10@200 (0.30%)

壁横筋：D6@100 (0.28%)

壁体部：RMユニット内にモルタル注入

梁下部：無収縮グラウトモルタル注入

3) 既存躯体打継ぎ処理：

柱、梁とも100mm×50mm角に1カ所の間隔でチッピング(直径15mm、深さ5mm程度)

*1 (株)浅沼組 技術本部技術研究所 (正会員)

*2 (株)新井組 設計技術部

*3 (株)松村組 生産管理部 (正会員)

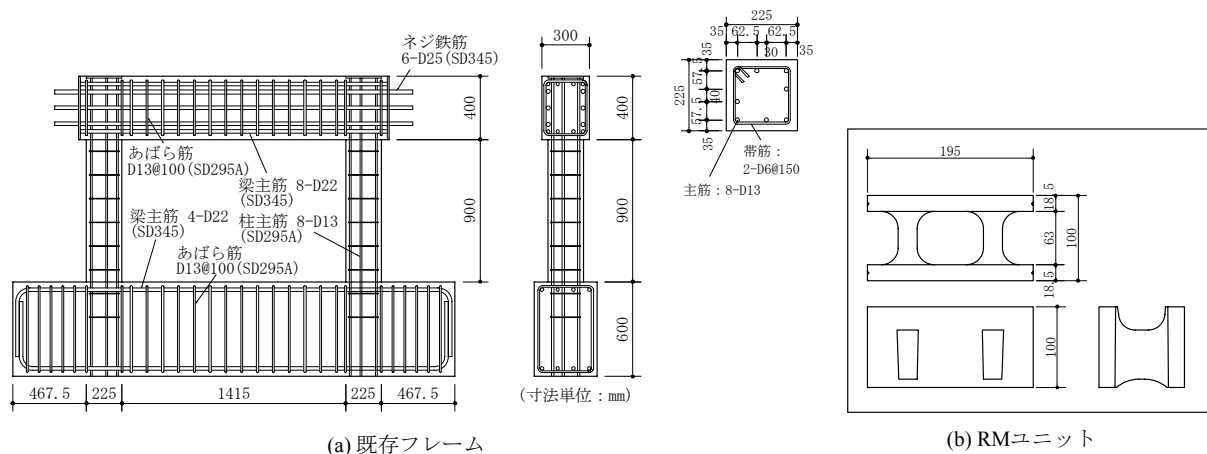


図-1 既存フレーム配筋図およびRMユニット

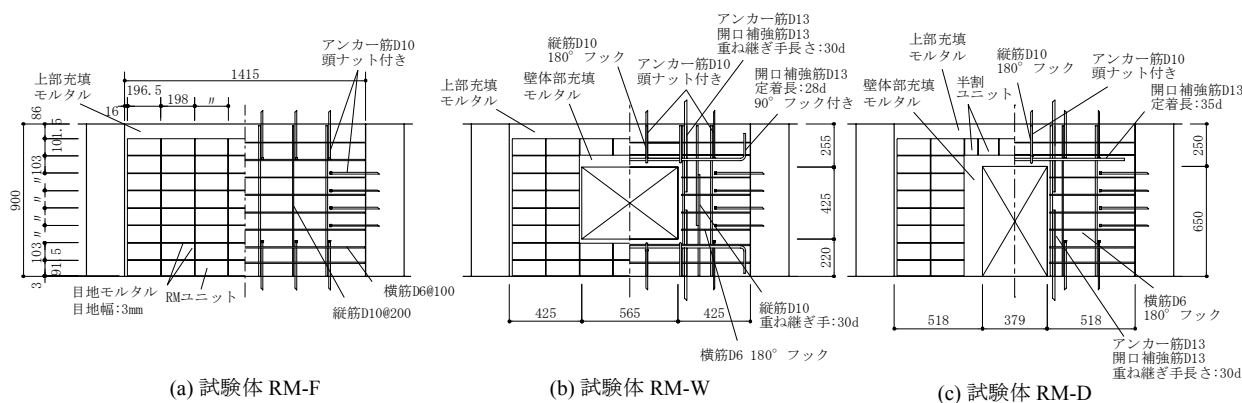


図-2 ユニット割付および配筋図

(3) 開口部

開口を有する試験体では、開口の周囲に開口補強筋 (D13) を配置した。補強量はRC規準³⁾に準じて決定し、定着長が不足する場合にはアンカー筋 (D13、有効埋め込み長さ10da) との重ね継ぎ手とした。また、壁筋は開口端部で180°フック付きとした。

2.2 使用材料

(1) コンクリートおよびモルタル

コンクリートおよびモルタルの試験結果を表-2(a)に示す。

(2) 鉄筋およびあと施工アンカー

鉄筋の引張試験結果を表-2(b)に、アンカーの引抜き試験結果を表-3に示す。

(3) RMユニットおよびプリズム強度

RMユニットおよびプリズム試験体の1軸圧縮試験結果を表-4に示す。RMユニットの圧縮強度は、単体のRMユニットを高さ方向に加力した際の最大強度を断面積で除したものを記載した。また、プリズム試験体はRMユニットを高さ方向に3段積み上げたものを使用した。

2.3 載荷方法

本実験では図-3に示すように、油圧ジャッキを用いて試験体に柱軸力比0.15相当の一定軸力 (N=392kN) を

表-2 材料試験結果

(a) コンクリートおよびモルタル

種別	部位	σ_B (N/mm ²)	ϵ_{co} (%)	E_c (kN/mm ²)	σ_t (N/mm ²)
コンクリート	既存フレーム	25.7	1.87	23.3	2.49
	上部充填	54.1	3.88	24.2	4.38
モルタル	壁体部充填	52.7	3.29	22.9	2.50
	目地	74.7	—	—	—

(注) σ_B : 圧縮強度, ϵ_{co} : σ_B 時ひずみ度, E_c : ヤング係数, σ_t : 割裂強度

(b) 鉄筋

使用部位	呼び名	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	伸び ^b (%)						
柱主筋 開口補強筋 アンカー筋	D13	SD295A	350	496	28						
						壁縦筋 アンカー筋	D10	SD295A	351	495	29

(注) σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強度

加えた状態で、押し引き型油圧ジャッキを用いて試験体頂部に水平力を加えた。その際、ジャッキの上部と反力ビームとの間にニードルローラーを配置し、軸力載荷用の油圧ジャッキの移動が試験体頂部の水平変形に追従できるようにした。

表-3 あと施工アンカー引抜強度

アンカー筋の種類		計算値			試験結果		
da (材質)	ℓ (mm)	Ta1 (kN)	Ta2 (kN)	Ta3 (kN)	試験片 番号	Tmax (kN)	破壊形式
D10 (SD295A)	80 (8da)	25	21	24	1	33.6	付着破壊
					2	35.0	付着破壊
					3	23.5	コーン状破壊
D13 (SD295A)	143 (11da)	44	35	41	1	62.2	アンカー筋破壊
					2	62.5	アンカー筋破壊
					3	62.7	アンカー筋破壊

(注) 1) da : アンカー筋径、ℓ : 埋め込み長さ
 2) Tmax : 引抜き試験による最大強度試験値
 3) Ta=min(Ta1, Ta2, Ta3)
 $Ta1 = a_a \cdot \sigma_y$
 $Ta2 = 0.23 \sqrt{\sigma_B} \cdot A_a$
 $Ta3 = \tau_a \cdot \pi \cdot d_a \cdot \ell_a$
 a_a : アンカー筋の断面積
 A_a : アンカー筋の有効水平投影面積
 $\tau_a = 10 \sqrt{(\sigma_B/21)}$: 付着強度
 $\ell_a = \ell - d_a$: 有効埋め込み長さ

表-4 RMユニットおよびプリズム強度

種別	σ_B (N/mm ²)	E_c (kN/mm ²)
RMユニット	48.8	—
プリズム試験体	27.1	22.7

(注) σ_B : 圧縮強度、 E_c : ヤング係数

載荷履歴は、図-4に示すように所定層間変形角 $R = \pm(0.5, 2, 5, 10, 15, 20)/1000 \text{ rad}$ の各3サイクルずつ正負繰り返り載荷とした。層間変形角 R は $R = \delta h/H$ (δh : 基礎梁上面から水平力の加力位置までの水平変位、 H : 加力点高さ) と定義した。

3. 実験結果

各試験体の荷重変形関係を図-5に示す。図中には各種の事象の発生した点および最大耐力実験値を示した。また、最終ひび割れ状況を図-6に示す。

(a) 試験体 RM-F

試験体 RM-F は $R = 3.7 \sim 4.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ の間に柱脚部のせん断ひび割れ (SCB)、壁部のせん断ひび割れ (SW)、柱帯筋の引張降伏 (HTY)、柱主筋の引張降伏 (CTY)、壁横筋の引張降伏 (WHY) が発生し、 $R = 4.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で最大耐力に達した。増設壁のせん断ひび割れ幅 (w) は、 $R = 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時に $w = 0.6 \text{ mm}$ であり、このときの上部梁と上部充填モルタルの間の滑り ($s = 8.5 \text{ mm}$) は層間変形角 ($\delta h = 11 \text{ mm}$) の75%程度になった。本試験体は最大耐力以降も、急激な耐力低下を起さず、破壊形式は上部梁と上部充填モルタル間の滑り破壊型となった。

(b) 試験体 RM-W

試験体 RM-W は $R = 1.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で壁横筋の引張降伏 (WHY)、 $R = 3.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で柱脚部のせん断ひび割れ (SCB) が生じ、 $R = 4.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で最大耐力に達した。本試験体は $R = 6.0, 6.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で柱帯筋の引張降伏 (HTY)、鉛直方向開口補筋筋の引張降伏 (WOY) の発生後、急激な耐力低下を起こした。 $R = 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時には、上部梁と上部充填モルタル間の滑りは観察されておらず、増設壁

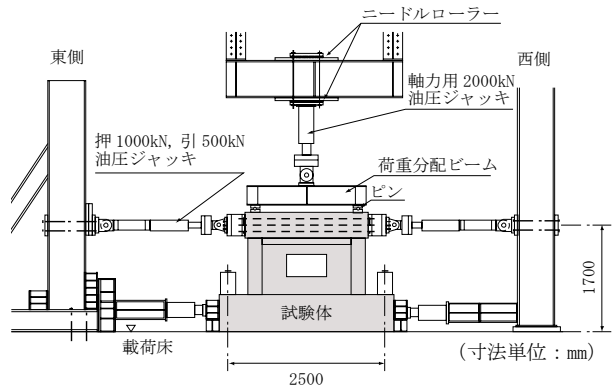


図-3 載荷装置

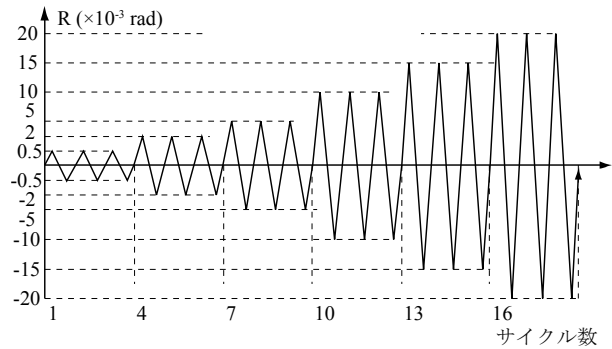


図-4 載荷サイクル

板のせん断ひび割れ幅 (w) は、3.5mm (開口西側) ~ 5.0mm (開口東側) に達し、破壊形式は増設壁板部のせん断破壊型となった。壁板部は、開口際袖壁部分にせん断ひび割れが集中していた。

(c) 試験体 RM-D

試験体 RM-D は $R = 2.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で壁横筋の引張降伏 (WHY)、 $R = 9.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で柱帯筋の引張降伏 (HTY) が生じ、 $R = 9.4 \times 10^{-3} \text{ rad}$ で最大耐力に達した。 $R = 10 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 時には、上部梁と上部充填モルタル間の滑り (s) が1.5mmとなったが、増設壁板のせん断ひび割れ幅 (w) は、2.0mm (開口西側) ~ 1.5mm (開口東側) に達するとともに、同変形角の繰返し載荷時に著しい耐力低下を起こし、破壊形式は増設壁板部のせん断破壊型となった。壁板部は、開口際袖壁部分にせん断ひび割れが集中していた。

4. 考察

4.1 終局耐力

各試験体の終局耐力計算値と実験値を表-5に示す。各種耐力の算定に用いた式を(1)~(7)に示す。式(1)はRC耐震診断基準⁴⁾における一体打ち壁としてのせん断耐力式である。式中の F_c は既存躯体部コンクリート強度と、RM組積体のプリズム強度とを柱断面積と壁断面積の比率に応じて平均した強度としている。式(3)はRC耐震改修指針⁵⁾における接合部破壊時のせん断耐力式であり、

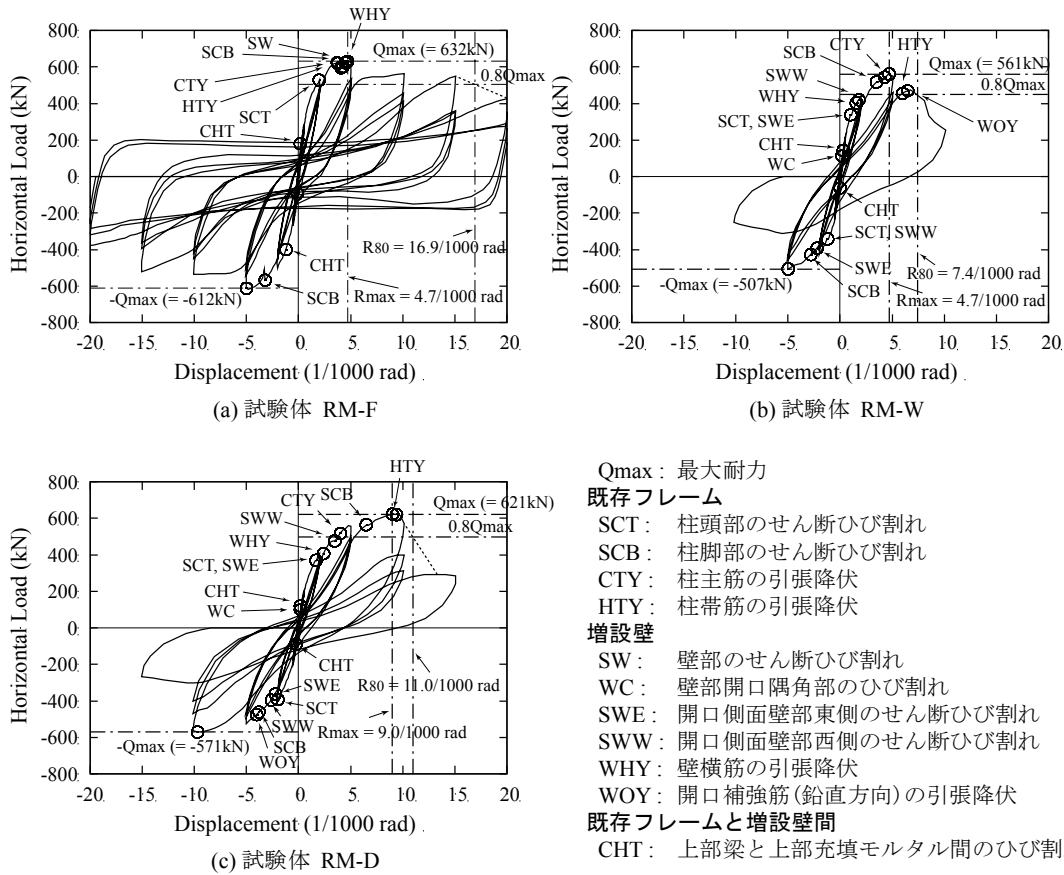


図-5 荷重変形関係

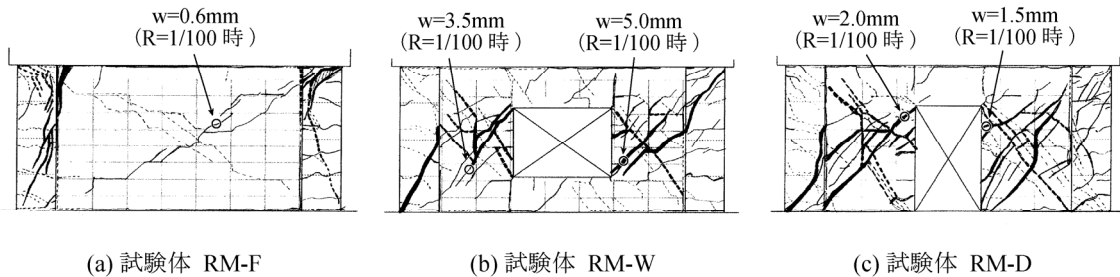


図-6 ひび割れ図

式(4)はそれに壁板の圧縮ストラットの効果⁶⁾を加算したものである。ただし、式(6)に示すように、開口による圧縮ストラットの効果に対する低減率は開口面積を考慮して算定を行った。

RM 増設耐震壁の終局曲げ耐力に対する終局せん断耐力の比(せん断余裕度 w_{Qsu}/w_{Qmu})は0.4~0.6程度であり、各試験体とも終局耐力計算値は終局せん断耐力によって決定した。無開口RM増設耐震壁(RM-F)では、一体型破壊時の耐力に対する接合部破壊時の耐力の比 a_{Qsu2}/w_{Qsu} が1に近いので計算上の破壊形式が明確ではないが、 Q_{max}/w_{Qsu} 、 Q_{max}/a_{Qsu2} はともに1.1程度であり、 w_{Qsu} 、 a_{Qsu2} のいずれも安全側の評価となっている。有開口RM増設耐震壁(RM-W, RM-D)については、 Q_{max}/w_{Qsu} は1.6~1.8程度であり、 w_{Qsu} は安全側の評価となっている。

$$w_{Qsu} = r \cdot \left\{ \frac{0.053 p_{te}^{0.23} (18 + F_c)}{M/(Q \cdot \ell) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_{se} \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_{0e} \right\} \cdot b_e \cdot j_e \quad (1)$$

p_{te} : 等価引張鉄筋比 (%), p_{se} : 等価横筋比

F_c : 平均コンクリート強度 (N/mm²)

σ_{wy} : 壁横筋の降伏強度 (N/mm²)

M/Q : 反曲点高さ (mm), ℓ : 壁の全長 (mm)

σ_{0e} : 軸方向応力度 (N/mm²)

b_e : 等価壁厚 (mm), j_e : 応力中心間距離 (mm)

$$r = 1 - \eta, \quad \eta = \max \left(\sqrt{h_o \ell_o / h_w \ell_w}, \ell_o / \ell_w \right) \quad (2)$$

h_o : 開口部高さ (mm), ℓ_o : 開口部長さ (mm)

h_w : 階高 (mm), ℓ_w : 両側柱の中心間距離 (mm)

$$a_{Qsu2} = Q_j + p Q_c + \alpha \cdot Q_c \quad (3)$$

$$a_{Qsu2} = Q_j + \Delta Q_{wu} + p Q_c + \alpha \cdot Q_c \quad (4)$$

表-5 終局耐力計算値と実験値

種別	試験体 記号	等価開口 周比 η	終局耐力計算値						実験結果		Q_{max} /wQsu	Q_{max} /aQsu2	
			wQsu (kN)	aQsu2 (kN)	aQsu2 (kN)	wQmu (kN)	wQsu /wQmu	aQsu2 /wQsu	Q_{max} (kN)	Rm (%rad.)			
RM増 設壁	無開口	RM-F	0.00	559	365	590	887	0.63	1.05	632	0.47	1.13	1.07
	窓開口	RM-W	0.36	355	331	467	865	0.41	1.31	561	0.47	1.58	1.20
	ドア開口	RM-D	0.37	353	331	465	865	0.41	1.32	621	0.94	1.76	1.33

wQsu : 一体打ち壁の終局せん断耐力 (1)式
aQsu2 : 接合部破壊時の終局せん断耐力 (3)式
aQsu2 : 接合部破壊時の終局せん断耐力 (圧縮ストラットを考慮) (4)式
wQmu : 終局曲げ耐力時せん断力 (7)式
Qmax : 最大耐力実験値、Rm : 最大耐力時の層間変形角
(注) 各試験体ともに、上表中に示したQmaxは正加力時の値を示す

Q_j : 上梁または下梁と壁板間の接合耐力 (N)
 $p_a Q_c$: 引張側柱頭部のパンチングシア耐力 (N)
 $\alpha \cdot Q_c$: 圧縮側柱の終局耐力 (N)
 ΔQ_{wu} : 壁板の圧縮ストラットによるせん断耐力 (N)
 $\Delta Q_{wu} = r' \Delta q_{wu} F_m t_w \ell_{w0}$ (5)
 $p_a \sigma_{ay} / F_m < 0.1$ のとき $\Delta q_{wu} = 0.07 - 0.3 p_a \sigma_{ay} / F_m$
 $p_a \sigma_{ay} / F_m \geq 0.1$ のとき $\Delta q_{wu} = 0.04$
 r' : 壁板の圧縮ストラットの効果に対する低減率

$$r' = 1 - \eta', \quad \eta' = \max\left(\sqrt{h_o \ell_o / h_{w0} \ell_{w0}}, \ell_o / \ell_{w0}\right) \quad (6)$$

h_o : 開口部高さ (mm), ℓ_o : 開口部長さ (mm)
 h_{w0} : 壁板の内り高さ (mm)
 ℓ_{w0} : 壁板の内り長さ (mm)
 $w Q_{mu} = w M_u / H_{w0}$ (7)
 $w M_u$: 増設壁の曲げ終局モーメント (Nm)
 H_{w0} : 階高 (mm)

4.2 初期剛性

各試験体の初期剛性計算値 (Keo) と実験値 (Kea) の関係を図-7に示す。初期剛性は式(8)により、実験値は載荷初期の接線剛性により求めた。初期剛性の計算値に対する実験値の比 (Kea/Keo) を比較すると、0.59~0.69となった。RC 増設耐震壁の実験結果⁶⁾では Kea/Keo は 0.45~0.53であり、無開口、窓開口、ドア開口のいずれの開口形状についても RM 増設耐震壁は RC 増設耐震壁を若干上回っている。一体打ちの RC 耐震壁試験体における Kea/Keo が、周辺フレームの影響によって0.59となっていることを考慮すると、無開口、開口付 RM 増設耐震壁の剛性は、一体打ち RC 耐震壁の剛性と同等と考えられる。

$$K_{eo} = Q/R = K_b K_s / (K_b + K_s) \cdot H_o \quad (8)$$

K_b : 曲げ剛性 (無開口)
 $K_b = 3E_c I_w / H_a^3$ (9)

(中央開口)
 $K_b = 3E_c I_w H_a / \left\{ H_a^3 - h_b^3 + h_a^3 \right\} I_{w0} + \left\{ h_b^3 - h_a^3 \right\} I_w \right\}$ (10)

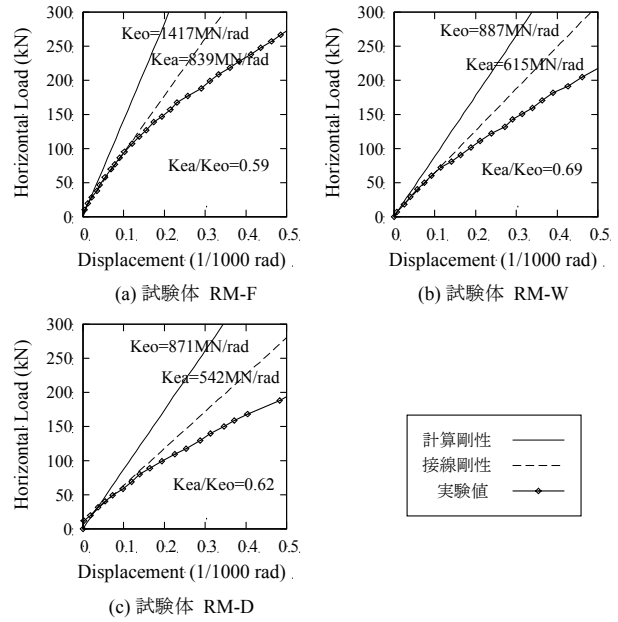


図-7 初期剛性

(ドア開口)

$$K_b = 3E_c I_w I_{w0} H_a / \left\{ h_a^3 I_{w0} + (H_a^3 - h_a^3) I_w \right\} \quad (11)$$

K_s : せん断剛性
 $K_s = r G_c A_w / (\kappa H_o)$ (12)

I_w : 無開口耐震壁の断面2次モーメント (mm⁴)

I_{w0} : 開口部を除く断面2次モーメント (mm⁴)

A_w : 無開口耐震壁の断面積 (mm²)

ただし $A_w = \ell_{w0} t_w$ とする

ℓ_{w0} : 側柱の中心間距離 (mm), t_w : 壁板の厚さ (mm)

H_a : 壁脚部から加力点までの高さ (mm)

H_o : 耐震壁の内り高さ (mm)

h_a : 開口上部から加力点までの高さ (mm)

h_b : 中央開口下部から加力点までの高さ (mm)

E_c : RM 組積体のヤング係数 (N/mm²)

G_c : RM 組積体のせん断弾性係数 (N/mm²)

κ : 形状係数 ($\kappa=1$ とする)

r : せん断剛性に対する開口低減率

$$r = 1 - 1.25\eta$$

η : 等価開口周比

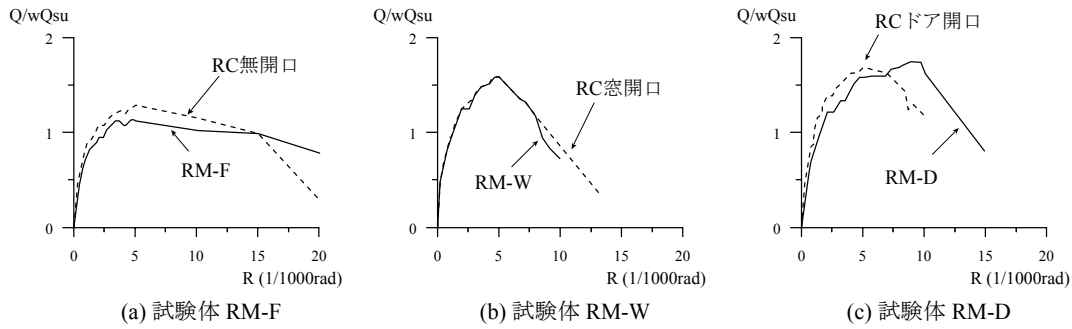


図-8 包絡線の比較

4.3 包絡線

RM 増設耐震壁試験体と RC 増設耐震壁試験体⁶⁾の荷重変形関係包絡線の比較を図-8に示す。荷重はせん断耐力計算値 (wQ_{su}) による正規化を行った。無開口、窓開口、ドア開口それぞれ、包絡線の形状はほぼ一致しており、RM 増設耐震壁は RC 増設耐震壁と同様の履歴性状を示していることがわかる。

4.4 等価開口周比

等価開口周比 (η) と終局耐力計算値に対する実験値の比 (Q_{max}/wQ_{su}) について、本実験結果と、既往の文献との比較を図-9に示す。既往の文献からは、RC 増設耐震壁⁶⁾および PCa ブロック増設耐震壁^{7),8)}の開口を含む実験シリーズを参照した。 η の範囲は0 (無開口) ~0.4 である。

開口を有する試験体 ($\eta > 0$) では、 η が大きい試験体ほど計算値に対する実験値の比が大きくなっている。この傾向は、本実験、RC 増設耐震壁、PCa ブロック増設耐震壁の各シリーズについて共通しており、等価開口周比が0.4以下の範囲について、開口による低減率の評価が安全側であるといえる。

5. まとめ

開口を有する RM 増設耐震壁の構造性能を評価するため、無開口 RM 増設耐震壁を含めた縮小モデルによるフレーム実験を行った。実験結果から、以下の知見を得た。

- 1) RM 増設耐震壁の荷重変形関係は、開口の有無や形状によらず、RC 増設耐震壁とほぼ同様の履歴性状を示す。
- 2) RM 増設耐震壁の終局せん断耐力は、壁板の圧縮ストラットの効果を考慮したせん断耐力式によって安全側に評価できる。
- 3) 有開口 RM 増設耐震壁試験体の計算耐力に対する実験時最大耐力の比は1.6~1.8となった。等価開口周比が大きい試験体ほど計算値に対する実験値の比が大きい傾向がみられる。

謝辞

本研究は RM 耐震補強研究会 (浅沼組, 新井組, 松村

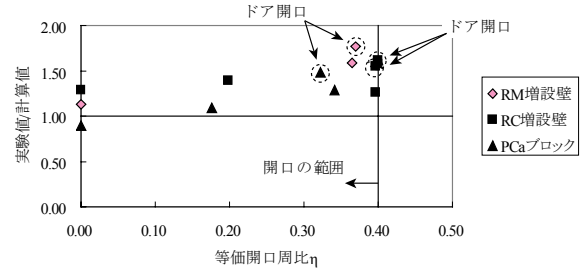


図-9 等価開口周比と耐力の関係

組) によるものです。本実験を行うに当たり、(財)日本建築総合試験所の益尾潔構造部長 (工学博士) にご指導をいただきました。また、縮小 RM ユニットの製作に当たっては久保田セメント工業(株)にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 建築研究振興協会：鉄筋コンクリート組積造 (RM 造) 建築物の構造設計指針・同解説, 2004
- 2) 中澤敏樹, 今西達也, 東健二, 安居功二：RM 構造を用いた増設耐震壁に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1543-1548, 2003.7
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999
- 4) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001
- 5) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計指針・同解説, 2001
- 6) 日本建築総合試験所：鉄筋コンクリート増設壁耐震補強設計・施工指針, 2001
- 7) 栗田康平, 増田安彦, 木村耕三ほか：小型プレキャストブロックを用いた増設耐震壁工法の開発 (その2~3), 日本建築学会大会梗概集, C-2, pp.687-690, 2002.8
- 8) 増田安彦, 栗田康平, 木村耕三：小型プレキャストブロックを用いた増設耐震壁工法の開発 (その5), 日本建築学会大会梗概集, C-2, pp.565-566, 2005.9